

Analisa Pengaruh Variasi Tanggem Pada Pengelasan Pipa Carbon Steel Dengan Metode Pengelasan SMAW dan FCAW Terhadap Deformasi dan Tegangan Sisa Menggunakan Analisa Pemodelan Elemen Hingga

Mahfud, Soeweify

Jurusan Teknik Perkapalan, Fakultas Teknologi Kelautan, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS)

Jl. Arief Rahman Hakim, Surabaya 60111

E-mail: weyfi@na.its.ac.id

Abstrak—Salah satu yang mempengaruhi deformasi dan tegangan sisa pada pengelasan pipa adalah pemasangan tanggem. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui deformasi dan tegangan sisa pada pengelasan pipa *carbon steel* dengan variasi pemasangan tanggem. Dilakukan analisa pemodelan ANSYS yang hasilnya divalidasi dengan hasil pengujian. Pengujian pada penelitian ini menggunakan pipa *carbon steel* SA 106 grade B schedule 40 dengan las kombinasi SMAW dan FCAW yang mengacu pada WPS dari pihak galangan kapal. Analisa pemodelan menggunakan elemen hingga dengan memvariasikan pemasangan tanggem, yaitu: pengelasan pipa tanpa tanggem, pengelasan pipa dengan 2 tanggem, dan pengelasan pipa dengan 4 tanggem. Dari analisa didapatkan pengelasan pipa dengan pemasangan tanggem berdasarkan tegangan sisa yang paling kecil, yaitu: pada variasi pengelasan pipa dengan 2 tanggem. Pada pengelasan pipa diameter 10 inches dengan 2 tanggem nilai deformasi total dan tegangan sisa adalah 0.193 mm dan 79.9 Mpa, pada pengelasan pipa diameter 12 inches dengan 2 tanggem nilai deformasi total dan tegangan sisa adalah 0.184 mm dan 74.9 Mpa.

Kata Kunci—deformasi, tegangan sisa, pipa *carbon steel* SA 106 Grade B Schedule 40, variasi pemasangan tanggem.

I. PENDAHULUAN

PENGELASAN merupakan hal umum yang banyak digunakan pada dunia industri maritim. Lingkup penggunaan teknik las dalam bidang ini sangat luas, meliputi: bidang perkapalan, bidang struktur bangunan laut (*offshore structures*) baik struktur terpancang (*fixed structure*) maupun struktur terapung (*floating structure*) dan struktur perpipaan (*pipeline structures*) yang dalam setiap tahap pengerjaannya selalu terdapat pengelasan [1].

Salah satu jenis pengelasan yang dipakai dalam bidang perkapalan adalah pengelasan antar pipa pada sistem perpipaan bongkar muat di kapal tanker. Di antara elemen-elemen pipa serta simpul-simpul penyambungan pipa semuanya dilakukan dengan pengelasan, maka sudah barang tentu salah satu masalah yang sangat penting dan dapat menentukan sifat dan kekuatan sambungan las adalah adanya deformasi dan tegangan sisa yang terjadi selama proses

pengelasan maupun setelah material mengalami pendinginan [2].

Proses pengelasan menyebabkan pemanasan tinggi yang tidak merata pada bagian-bagian yang akan disambung tersebut, dimana area dari benda kerja yang dilas mengalami pemanasan hingga mencapai $\pm 1783^{\circ}\text{F}$ kemudian mengalami penurunan suhu secara bertahap. Pemanasan lokal dan laju pendinginan bertahap menyebabkan perubahan *volumetric* yang akhirnya menghasilkan penyebaran panas, deformasi dan tegangan sisa [3]. Timbulnya deformasi dan tegangan sisa kemudian menjadi perhatian serius. Untuk itulah perlu dilakukan analisa pemodelan elemen hingga sehingga tegangan sisa dan deformasi yang terjadi dalam pengelasan dapat diminimalisir.

II. TINJAUAN PUSTAKA

A. Thermal Las

Pada proses pengelasan hampir semuanya dilakukan dengan pemanasan setempat atau lokal [3]. Beban *heat input* yang diberikan pada saat pengelasan menyebabkan peningkatan temperatur material yang terkena busur api las sampai pada suhu lebur. Perubahan temperatur pada daerah yang mengalami kontak langsung dengan busur las berlangsung dengan sangat cepat sehingga menciptakan perbedaan temperatur dengan daerah di dekatnya [3]. Segera setelah perbedaan temperatur terjadi panas mulai mengalir ke sekitar daerah pengelasan yang mempunyai temperatur lebih rendah sehingga terjadi distribusi panas ke daerah sekitar alur las. Distribusi temperatur yang terjadi pada saat proses pemanasan maupun pendinginan tidak merata pada seluruh material. Ketidakteraturan distribusi temperatur inilah yang menjadi penyebab timbulnya deformasi pada struktur las [3]. Sehingga untuk dapat menyelesaikan berbagai persoalan dari tegangan dan deformasi hasil pengelasan harus diketahui dahulu bagaimana distribusi dari temperatur yang dihasilkan terhadap material las.

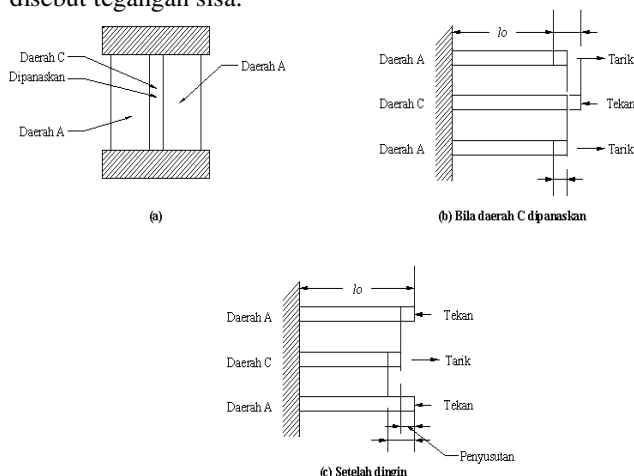
B. Deformasi

Deformasi merupakan perubahan pada material baik perubahan dimensi maupun struktur karena mendapat beban dari luar [3]. Beban bisa berupa beban mekanis maupun proses fisika-kimia. Perubahan yang terjadi pada material dapat berupa pemuaian maupun pengkerutan. Perubahan ini dimulai dari perubahan struktur dalam material sebelum akhirnya berdampak pada perubahan dimensi material. Dalam pengelasan terdapat beberapa proses yang terjadi antara lain: pencairan logam, pendinginan, pengembangan *thermal*, pemanjangan maupun penyusutan material las, sehingga pada konstruksi las seringkali terjadi perubahan bentuk atau deformasi. Faktor-faktor yang mempengaruhi terbentuknya deformasi las dapat dibagi dalam dua kelompok, yaitu kelompok pertama yang sangat erat hubungannya dengan masukan panas pengelasan dan kelompok kedua yang disebabkan oleh adanya penahan atau penghalang pada sambungan las. Ada beberapa faktor yang perlu diperhatikan dalam pengelasan agar deformasi dapat dihindari, antara lain [3]:

1. Jumlah *welding pass*
2. *Welding sequence*
3. Derajat pengekanan
4. Detail sambungan

C. Tegangan Sisa

Tegangan yang muncul selama proses pengelasan biasa disebut sebagai tegangan dalam atau tegangan yang terjebak dalam material [3]. Tegangan dalam adalah tegangan yang bekerja pada material meskipun tidak ada gaya luar yang bekerja pada benda tersebut. Pada saat proses pengelasan, bagian material yang di las menerima panas pengelasan setempat dan selama proses berjalan suhunya berubah terus sehingga suhu tidak merata. Karena panas tersebut, maka pada bagian yang dilas terjadi pengembangan *thermal*. Sedangkan bagian yang dingin tidak berubah sehingga terbentuk penghalang pengembangan yang mengakibatkan terjadinya peregang yang rumit. Kalau tidak dihindari, peregang ini akan menyebabkan terjadinya perubahan bentuk tetap yang disebabkan adanya perubahan besaran mekanik. Di samping terjadi perubahan bentuk yang dengan sendirinya terjadi regangan, maka terjadi juga tegangan yang sifatnya tetap yang disebut tegangan sisa.



Gambar 1. Pembentukan tegangan sisa [3]

Distribusi tegangan sisa tergantung dari jenis dan bentuk lasan. Dalam las tumpul pada garis lasan dengan arah memanjang akan mencapai batas kekuatan luluh pada garis las dan kemudian menurun dan mencapai nol pada ujung material. Sedangkan pada arah melintang garis las terjadi keseimbangan antara tegangan tarik dan tekan. Dalam sambungan las bentuk lingkaran, distribusi dalam arah sudut selalu simetris terhadap satu garis yang melalui pusat lingkaran dan sifat tegangannya baik pada arah sudut ataupun radial selalu tarik.

D. Metode Elemen Hingga

Metode elemen hingga merupakan salah satu metode numerik yang dapat digunakan untuk menyelesaikan masalah structural, thermal, dan elektromagnetik [4]. Prosedur elemen hingga mengurangi variabel yang tidak diketahui menjadi sejumlah berhingga dengan membagi daerah penyelesaian menjadi bagian kecil yang disebut elemen dan dinyatakan sebagai variabel medan yang tidak diketahui dalam istilah dianggap sebagai fungsi pendekatan (*approximation functions/interpolation functions/shape functions*) dalam setiap elemen [4].

III. METODOLOGI PENELITIAN

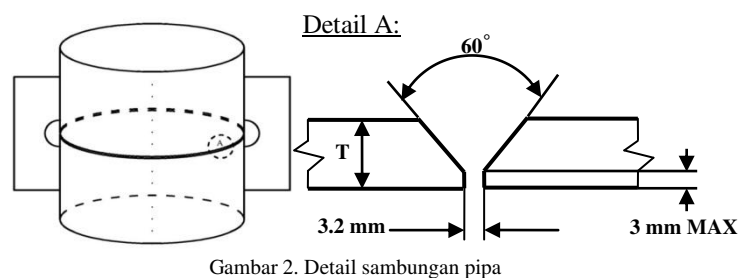
Pada penelitian ini dilakukan pengujian dan pemodelan pada pengelasan sambungan pipa dengan variasi tanggem. Hasil dari pemodelan sambungan pipa baik hasil pembebanan thermal maupun struktur akan divalidasi menggunakan hasil dari pengujian.

A. Tahap Pengujian

Pengujian yang dilakukan pada penelitian ini terdiri dari 4 (empat) tahapan, yaitu:

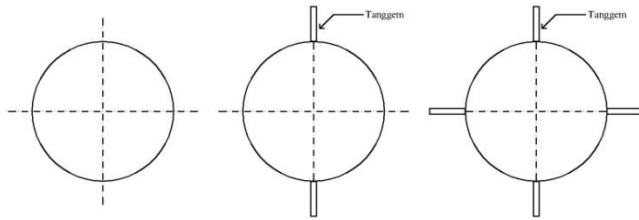
1. Tahap persiapan. Langkah-langkah pada tahap ini adalah mempersiapkan materil dan peralatan-peralatan untuk pengujian. Material pipa yang digunakan pada pengujian ini adalah pipa *carbon steel SA106 grade B schedule 40*. Di bidang perkapalan pipa ini diaplikasikan pada sistem perpipaan bongkar muat pada kapal tanker. Pengelasan pada pengujian ini menggunakan metode las kombinasi SMAW dan FCAW. Berikut ini data ukuran meterial dan detail sambungan material pipa untuk pengujian adalah sebagai berikut:

- Diameter pipa = 304.8 mm
- Panjang pipa (LOA) = 300 mm
- Tebal pipa = 10.3 mm



2. Tahap pemasangan tanggem dan pengukuran kondisi awal sebelum pengelasan. Pada tahap ini tanggem dipasang pada pipa yang akan dilas. Variasi tanggem yang digunakan

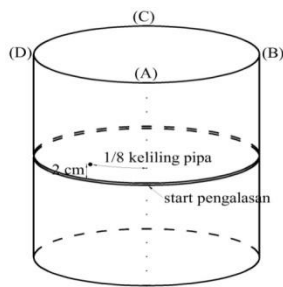
yaitu: pengelasan pipa tanpa tanggem, pengelasan pipa dengan 2 (dua) tanggem yang dipasang 180° antara satu sama lain, pengelasan pipa dengan 4 (empat) tanggem yang dipasang 90° antara satu sama lain.



Gambar 3. Variasi pemasangan tanggem

Setelah tanggem terpasang dilakukan pengukuran awal untuk didapatkan nilai awal (nilai asumsi nol) yang akan digunakan sebagai acuan pada pengukuran setelah setelah pengelasan.

3. Tahap pengelasan dan pengukuran perubahan suhu pengelasan tiap detik. *Pointer thermocouple infrared* diarahkan pada titik pengamatan yang berjarak 2 cm dari kampuh las dan $1/8$ keliling pipa dari *start* mulai pengelasan untuk mendapatkan nilai perubahan temperatur tiap detik.



Gambar 4. Posisi pointer thermocouple infrared

4. Tahap pengukuran setelah pengelasan. Pada tahap ini didapatkan nilai deformasi pipa setelah pengelasan dan pendinginan berlangsung. Nilai deformasi = nilai pengukuran setelah pengelasan - nilai pengukuran kondisi awal sebelum pipa dilakukan pengelasan.

B. Tahap Analisa Menggunakan Pemodelan Elemen Hingga

Pada analisa pemodelan elemen hingga, simulasi pengelasan dilakukan dengan dua tahap, yaitu:

1. Tahap analisa *thermal*. Tahap ini diperoleh distribusi panas berupa perubahan temperatur terhadap waktu selama proses pengelasan sampai pendinginan berlangsung. Inputan untuk analisa *thermal* berupa: *thermal properties* dan *heat flux*. Perhitungan *heat flux* menggunakan persamaan berikut [2]:

$$Q = \eta I U \quad (1)$$

$$A_f = b \times v \times t \quad (2)$$

$$A_e = \frac{1}{4} \pi D^2 \quad (3)$$

$$A_1 = p \times l \quad (4)$$

$$q_1 = \frac{Q}{A_e} \quad (5)$$

$$q_1 = q_e \frac{A_1}{A_f} \quad (6)$$

dimana:

Q = *heat input bersih*

η = efisiensi pengelasan

U = voltase

I = kuat arus

A_f = luas area pembebanan

b = lebar kampuh

v = kecepatan pengelasan

t = waktu pengelasan per elemen

A_e = luas penampang elektroda

D = diameter elektroda

A_1 = luas satu elemen

p = panjang satu elemen

l = lebar satu elemen

q_1 = *heat flux*

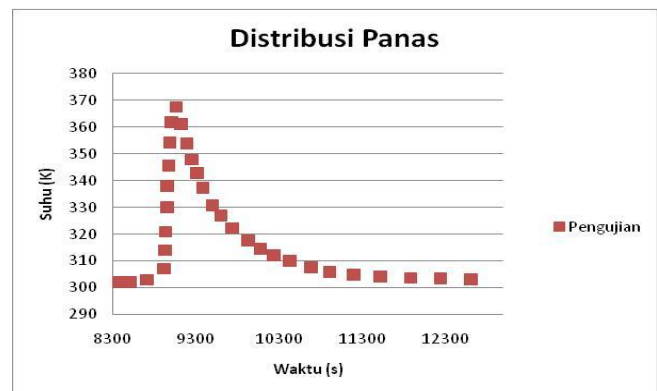
Dari hasil perhitungan diperoleh besarnya *heat flux* untuk masing-masing variasi adalah:

- Pipa diameter 12 inches tanpa tanggem:
 Layer ke-1 = $8.55E+07$ Watt/ m^2
 Layer ke-2 = $1.24E+09$ Watt/ m^2
 Layer ke-3 = $1.24E+09$ Watt/ m^2
- Pipa diameter 12 inches dengan 2 tanggem:
 Layer ke-1 = $7.78E+07$ Watt/ m^2
 Layer ke-2 = $1.39E+09$ Watt/ m^2
 Layer ke-3 = $1.39E+09$ Watt/ m^2
- Pipa diameter 12 inches dengan 4 tanggem:
 Layer ke-1 = $7.78E+07$ Watt/ m^2
 Layer ke-2 = $1.30E+09$ Watt/ m^2
 Layer ke-3 = $1.30E+09$ Watt/ m^2

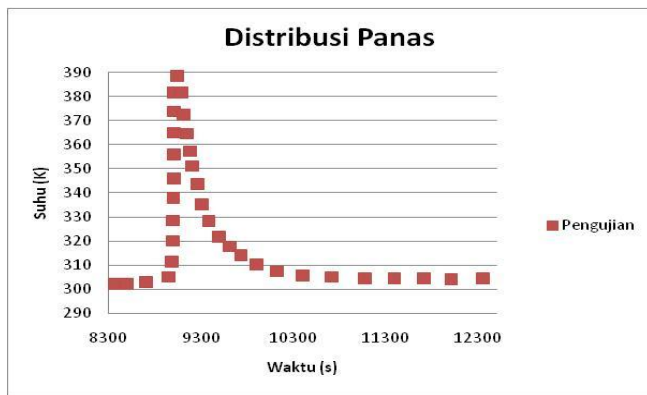
2. Tahap analisa pemodelan struktur. Tahap ini diperoleh nilai deformasi dan tegangan sisa. Inputan untuk analisa struktur berupa: *mechanical properties* material dan hasil analisa *thermal*. Pada model struktur salah satu bagian penting yang harus dilakukan sebelum pembebanan adalah pemberian kondisi batas yang berupa tumpuan (*constraint*). Pemberian tumpuan ini berguna agar proses perhitungan dapat dilakukan dan tegangan yang dihasilkan dapat ditampilkan.

IV. ANALISA DAN PEMBAHASAN

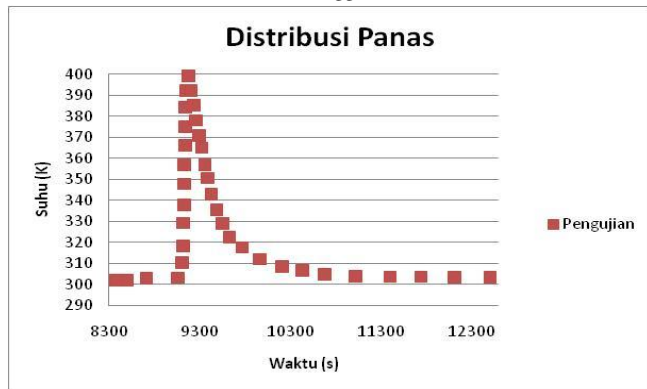
A. Distribusi Panas Hasil Pengujian



Gambar 5. Grafik distribusi panas pengelasan pipa diameter 12 inches tanpa tanggem.



Gambar 6. Grafik distribusi panas pengelasan pipa diameter 12 inches dengan 2 tanggem.



Gambar 7. Grafik distribusi panas pengelasan pipa diameter 12 inches dengan 4 tanggem.

B. Deformasi Hasil Pengujian

Tabel 1.

Nilai deformasi pengelasan pipa diameter 12 inches tanpa tanggem

Jarak Dari Kampuh Las (mm)		-120	-100	-80	-60	-40	-20		20	40	60	80	100	120
Besarnya Deformasi Hasil Pengujian (mm)	A	0.18	0.2	0.2	0.21	0.22	0.22		0.21	0.21	0.2	0.19	0.18	0.16
	B	0.15	0.15	0.17	0.18	0.18	0.19		0.2	0.18	0.18	0.16	0.15	0.13
	C	0.12	0.15	0.16	0.18	0.19	0.19		0.21	0.19	0.19	0.18	0.16	0.16
	D	0.18	0.2	0.21	0.22	0.22	0.24		0.24	0.23	0.23	0.21	0.19	0.18

Tabel 2.

Nilai deformasi pengelasan pipa diameter 12 inches dengan 2 tanggem

Jarak Dari Kampuh Las (mm)		-120	-100	-80	-60	-40	-20		20	40	60	80	100	120
Besarnya Deformasi Hasil Pengujian (mm)	A	0.12	0.14	0.16	0.16	0.17	0.18		0.18	0.18	0.17	0.16	0.14	0.13
	B	0.12	0.12	0.13	0.14	0.14	0.16		0.16	0.15	0.14	0.12	0.12	0.11

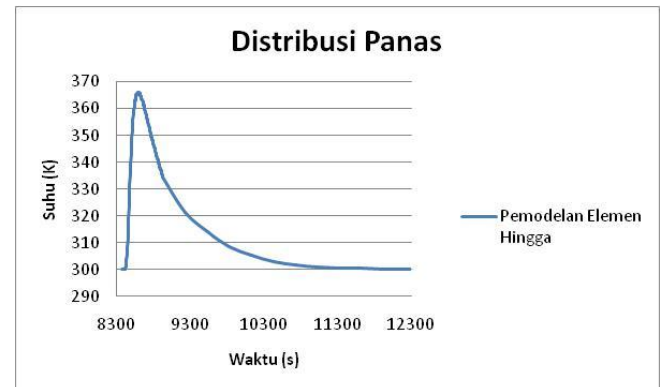
Tabel 3.

Nilai deformasi pengelasan pipa diameter 12 inches dengan 4 tanggem

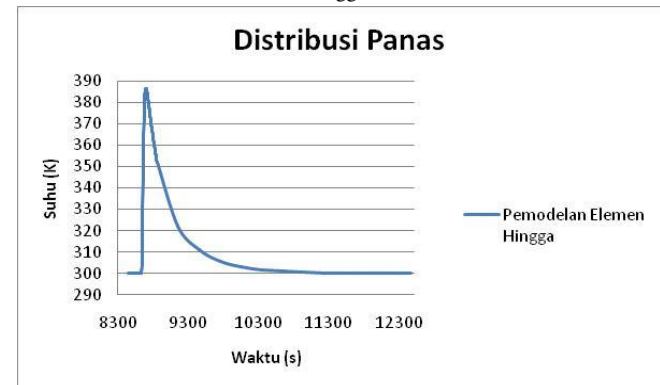
Jarak Dari Kampuh Las (mm)		-120	-100	-80	-60	-40	-20		20	40	60	80	100	120
Besarnya Deformasi Hasil Pengujian (mm)	A	0.05	0.07	0.08	0.08	0.09	0.09		0.09	0.09	0.08	0.07	0.06	0.05
	B	0.05	0.05	0.05	0.06	0.06	0.07		0.04	0.04	0.04	0.03	0.03	0.03
	C	0.04	0.04	0.05	0.05	0.06	0.08		0.08	0.08	0.06	0.05	0.03	0.01
	D	0.05	0.06	0.06	0.07	0.08	0.09		0.09	0.08	0.08	0.06	0.07	0.03

Distribusi panas berupa perubahan temperatur tiap waktu dan nilai deformasi yang terbentuk pada pipa digunakan untuk validasi hasil analisa *thermal* dan analisa stuktur pada analisa pemodelan elemen hingga.

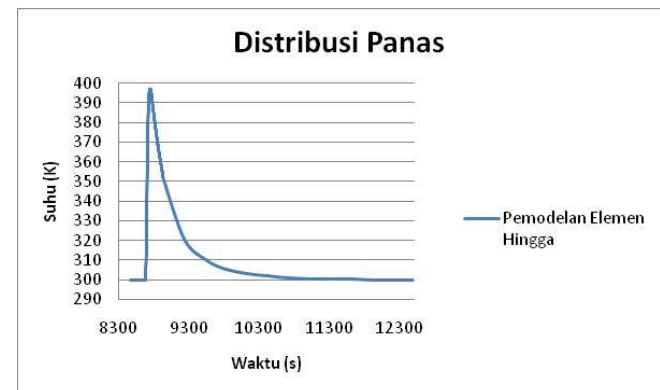
C. Distribusi Panas Hasil Analisa Pemodelan Elemen Hingga



Gambar 8. Grafik distribusi panas pengelasan pipa diameter 12 inches tanpa tanggem.



Gambar 9. Grafik distribusi panas pengelasan pipa diameter 12 inches dengan 2 tanggem.



Gambar 10. Grafik distribusi panas pengelasan pipa diameter 12 inches dengan 4 tanggem.

D. Deformasi Hasil Analisa Pemodelan Elemen Hingga

Tabel 4.

Nilai deformasi pengelasan pipa diameter 12 inches tanpa tanggem

Jarak Dari Kampuh Las (mm)		-120	-100	-80	-60	-40	-20		20	40	60	80	100	120
Besarnya Deformasi Hasil Pemodelan ANSYS (mm)	A	0.12	0.13	0.15	0.17	0.17	0.18		0.18	0.18	0.17	0.15	0.13	0.11
	B	0.10	0.12	0.14	0.15	0.16	0.17		0.17	0.16	0.15	0.13	0.11	0.09
	C	-0.10	-0.11	-0.12	-0.13	-0.14	-0.15		-0.15	-0.14	-0.13	-0.12	-0.11	-0.10
	D	-0.12	-0.14	-0.15	-0.17	-0.18	-0.19		-0.19	-0.18	-0.16	-0.15	-0.13	-0.12

Tabel 5.

Nilai deformasi pengelasan pipa diameter 12 inches dengan 2 tanggem

Jarak Dari Kampuh Las (mm)		-120	-100	-80	-60	-40	-20		20	40	60	80	100	120
Besarnya Deformasi Hasil Pemodelan ANSYS (mm)	A	0.10	0.11	0.12	0.14	0.15	0.16		0.16	0.15	0.14	0.12	0.11	0.10
	B	-0.11	-0.11	-0.12	-0.13	-0.14	-0.14		-0.14	-0.14	-0.13	-0.12	-0.11	-0.11

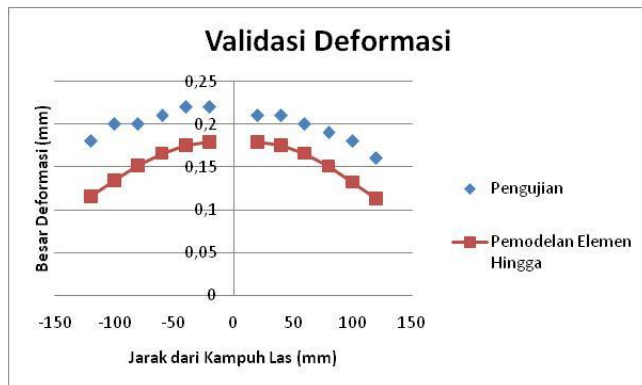
Tabel 6.

Nilai deformasi pengelasan pipa diameter 12 inches dengan 4 tanggem

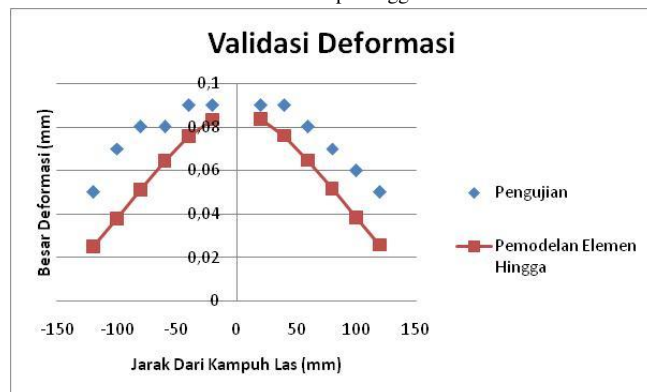
Jarak Dari Kampuh Las (mm)	-120	-100	-80	-60	-40	-20	20	40	60	80	100	120
A	0.02	0.04	0.05	0.06	0.08	0.08	0.08	0.08	0.06	0.05	0.04	0.03
B	-0.04	-0.04	-0.05	-0.05	-0.05	-0.06	-0.06	-0.05	-0.05	-0.05	-0.04	-0.04
C	-0.05	-0.05	-0.06	-0.06	-0.07	-0.07	-0.07	-0.07	-0.06	-0.06	-0.05	-0.05
D	0.04	0.05	0.06	0.08	0.09	0.09	0.09	0.09	0.08	0.06	0.05	0.04

E. Validasi

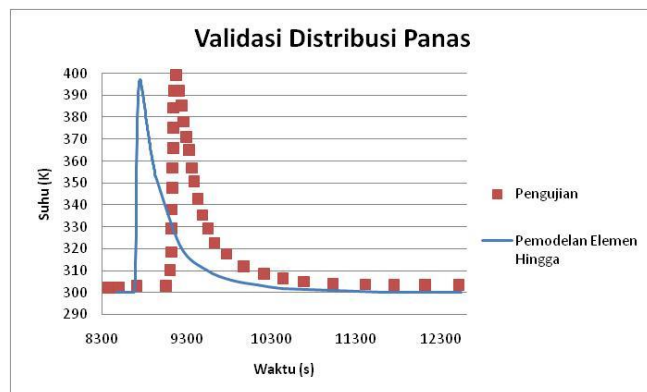
Validasi digunakan untuk memastikan bahwa analisa dengan pemodelan elemen hingga telah sesuai dengan pengujian [2]. Validasi yang dipakai pada penelitian tugas akhir ini ada 2, yaitu: validasi distribusi panas berupa perubahan temperatur dan validasi deformasi.



Gambar 11. Grafik validasi distribusi panas pengelasan pipa diameter 12 inches tanpa tanggem.

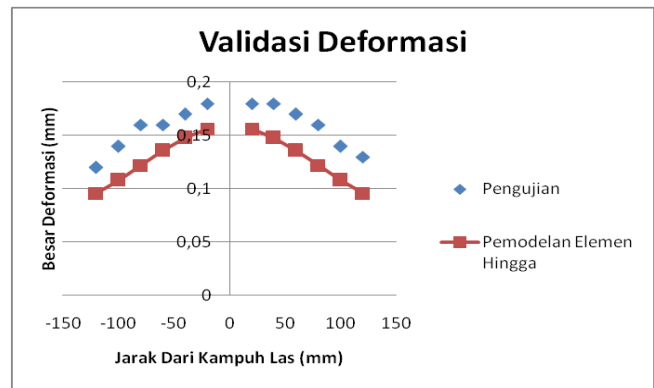


Gambar 12. Grafik validasi distribusi panas pengelasan pipa diameter 12 inches dengan 2 tanggem.

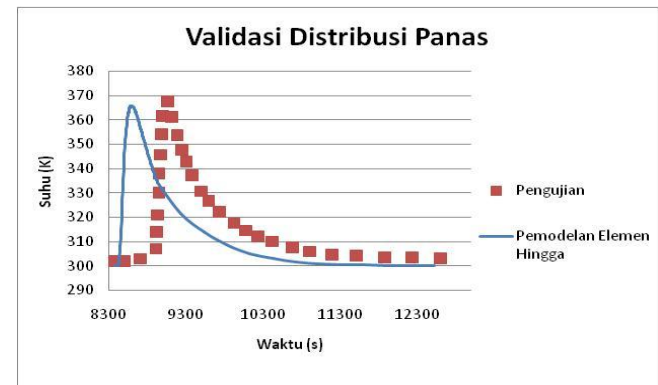


Gambar 13. Grafik validasi distribusi panas pengelasan pipa diameter 12 inches dengan 4 tanggem.

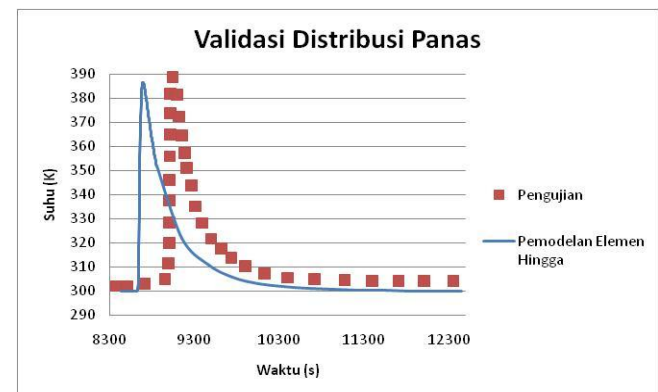
F. Validasi Deformasi



Gambar 14. Grafik validasi deformasi pengelasan pipa diameter 12 inches tanpa tanggem.



Gambar 15. Grafik validasi deformasi pengelasan pipa diameter 12 inches dengan 2 tanggem.



Gambar 16. Grafik validasi deformasi pengelasan pipa diameter 12 inches dengan 4 tanggem.

G. Analisa Dan Pembahasan

Tabel 7.

Nilai deformasi pengelasan pipa carbon steel dengan variasi tanggem

Variasi	Deformasi			
	Sumbu X (mm)	Sumbu Y (mm)	Sumbu Z (mm)	Total Resultan (mm)
Pipa Diameter 12 inches Tanpa Tanggem	0.180	0.169	0.111	0.271
Pipa Diameter 12 inches 2 Tanggem	0.165	0.056	0.084	0.193
Pipa Diameter 12 inches 4 Tanggem	0.098	0.100	0.068	0.156
Pipa Diameter 10 inches Tanpa Tanggem	0.187	0.162	0.094	0.265
Pipa Diameter 10 inches 2 Tanggem	0.151	0.071	0.078	0.184
Pipa Diameter 10 inches 4 Tanggem	0.014	0.129	0.096	0.161

Deformasi total maksimum terjadi pada pengelasan pipa tanpa tanggem sedangkan deformasi minimum terjadi pada pengelasan pipa dengan 4 tanggem. walaupun nilai perbedaannya tidak terlalu signifikan. Pemasangan tanggem yang lebih banyak (4 tanggem) menyebabkan daerah yang mendapat tumpuan semakin banyak sehingga semakin banyak daerah-daerah yang akan menahan struktur ketika struktur tersebut mengalami perubahan bentuk (deformasi). Hal inilah yang menyebabkan deformasi pada pengelasan pipa dengan 4 tanggem lebih kecil jika dibandingkan dengan deformasi pada pengelasan pipa tanpa tanggem dan pengelasan pipa dengan 2 tanggem.

Tabel 8.

Nilai tegangan sisa pengelasan pipa carbon steel dengan variasi tanggem

Variasi	Tegangan Sisa (MPa)
Pipa Diameter 12 inches Tanpa Tanggem	186
Pipa Diameter 12 inches 2 Tanggem	79.9
Pipa Diameter 12 inches 4 Tanggem	161
Pipa Diameter 10 inches Tanpa Tanggem	172
Pipa Diameter 10 inches 2 Tanggem	74.9
Pipa Diameter 10 inches 4 Tanggem	270

Dari tabel di atas terlihat bahwa tegangan sisa terbesar terjadi pada pengelasan pipa tanpa tanggem dan pengelasan pipa dengan 4 tanggem. Sedangkan pada pengelasan pipa dengan 2 tanggem terbentuk tegangan sisa terkecil. Pada pengelasan pipa tanpa tanggem dan pengelasan pipa dengan 4 tanggem tumpuan yang diberikan lebih banyak dibandingkan pada pengelasan pipa dengan 2 tanggem. Pemberian tumpuan pada model disesuaikan dengan kondisi sebenarnya seperti pada saat pengujian dilakukan. Dari tabel terlihat pula pada pengelasan pipa diameter 10 inches dengan 4 tanggem besarnya tegangan sisa maksimum yang terjadi ternyata melebihi nilai yield strength yang diijinkan yaitu sebesar 270 Mpa.

Berdasarkan analisa deformasi dan tegangan sisa yang terbentuk pada masing-masing model pengelasan pipa dengan variasi pemasangan tanggem maka diketahui bahwa variasi pengelasan pipa dengan 2 tanggem adalah pengelasan terbaik. Meskipun deformasi yang terbentuk pada variasi ini lebih besar bila dibandingkan dengan pengelasan pipa dengan 4 tanggem namun tegangan sisa yang terbentuk lebih kecil dan memenuhi tegangan sisa yang diijinkan.

V. KESIMPULAN

Berdasarkan analisa dari hasil percobaan dan pemodelan elemen hingg pengelasan pipa dengan variasi pemasangan tanggem yang telah dilakukan maka dalam bab ini dapat diuraikan beberapa kesimpulan untuk mendapatkan variasi pemasangan tanggem yang terbaik. Dalam bab ini juga akan disampaikan beberapa saran yang bisa dibahas sebagai kelanjutan dari penelitian tugas akhir ini.

A. Kesimpulan

Berdasarkan hasil analisa yang telah dilakukan maka dapat diambil kesimpulan sebagai berikut:

1. Semakin banyak tanggem yang digunakan maka deformasi yang terbentuk pada pengelasan pipa carbon steel semakin kecil. Pengelasan pipa dengan 4 tanggem menghasilkan deformasi yang kecil.
2. Tegangan sisa yang terbentuk ditentukan oleh kondisi batas berupa tumpuan (*constraint*). Semakin banyak tumpuan yang diberikan semakin besar tegangan sisa yang terbentuk. Pengelasan pipa dengan 2 tanggem menghasilkan tegangan sisa yang kecil.
3. Pemilihan posisi pemasangan tanggem terbaik dipilih berdasarkan tegangan sisa yang terjadi adalah yang paling kecil. Berdasarkan hasil analisa dipilih variasi pengelasan pipa dengan 2 tanggem sebagai yang terbaik. Walaupun deformasi yang terjadi pada variasi ini sedikit lebih besar jika dibandingkan dengan variasi pengelasan pipa dengan 4 tanggem.

B. Saran

Dalam pengerjaan tugas akhir ini terdapat beberapa kekurangan. Oleh karena itu penulis memberikan saran-saran untuk perbaikan pada penelitian selanjutnya, yaitu:

1. Material pipa yang digunakan pada penelitian ini sebelum dilakukan pengelasan mengalami proses pengerjaan, salah satunya adalah proses cutting yang menggunakan Oxy Acetylene Cutting, hal ini tentunya menghasilkan deformasi akibat panas yang ditimbulkan. Oleh karena itu mendapatkan hasil lebih sempurna disarankan untuk menambahkan bentuk deformasi yang sudah terjadi sebelum pengelasan pada pemodelan elemen hingga.
2. Selain variasi tanggem, dilakukan juga analisa pemodelan elemen hingga dengan variasi welding sequence.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] L. Amarna, *Pengaruh Residual Stress pada Pengelasan Pipa*. Surabaya: Institut Teknologi Sepuluh Nopember, (1988).
- [2] M.M. Zaed, *Analisa Terbentuknya Tegangan Sisa Dan Deformasi Pada Pengelasan Pipa Beda Jenis Menggunakan Metode Elemen Hingga*. Surabaya: Institut Teknologi Sepuluh Nopember, (2010).
- [3] H. Wiryosumarto, T. Okumura, *Teknologi Pengelasan Logam*. Pradnya Paramita. Jakarta, (1996).
- [4] M. W. Ghazali, *Analisa Pengaruh Las Titik Dan Urutan Pengelasan Terhadap Distorsi Dan Tegangan Sisa Pada Pengelasan Sambungan Pipa Elbow Dengan Metode Elemen Hingga*. Surabaya: Institut Teknologi Sepuluh Nopember, (2011).